

## 乾燥現象の数値シミュレーションについて

岩手大学工学部 船崎健一, 岩手大学三陸復興推進機構 井村忠継

### 1. はじめに

食品の保存を目的として行われる食品乾燥は人類の歴史と古くから関わりを持ってきた。原料の持つ水分を少なくすることにより、貯蔵や輸送コストの減少、微生物による腐敗の抑制および風味や色調の変化の防止などの恩恵がある<sup>(1)</sup>とされている。これらの利点から現代に至るまで食品乾燥は重要な食品加工方法の一つとなっている。

本研究では、人工的な乾燥方法の中でも箱型乾燥機および気流乾燥機についてそれぞれ述べる。箱型乾燥機および気流乾燥機はそれぞれ、三陸沿岸地域で行われるコンブ乾燥およびそば粉の乾燥を研究対象としており、三陸地方におけるコンブ乾燥の問題点およびそば粉乾燥機の気流解析結果について報告する。

### 2. 三陸沿岸地方におけるコンブの乾燥室

#### 2-1. 諸言

三陸地方の主な商品の一つであるコンブは岩手県の漁家の 17%が扱う重要な商品である<sup>(2)</sup>。輸入割当制度 (IQ 制度) によって国内産コンブは保護されてきたが、90 年代中盤以降、IQ 枠外輸入量が増大するなどの国外産コンブの脅威にも晒されつつある<sup>(3)</sup>。このことに加え、2011 年に発生した東日本大震災からの復興という観点からも岩手産コンブの競争力の向上が求められている。燃料代の高騰、コンブ乾燥に要する時間の短縮の要求などの観点から、コンブの加工工程の中でも乾燥工程の効率化を目的とし、コンブ乾燥施設内部の熱流体挙動を温湿度計測および数値計算により調べた。

#### 2-2. 実験装置・実験方法および解析条件

Fig.1 に実験に用いた乾燥室の模式図を示す。この乾燥室は宮古市近辺で使用されているタイプの乾燥室であり、その体積は  $9.0 \times 4.4 \times 4.4 \text{ [m}^3\text{]}$  である。空気の流入口である窓から流入した空気が乾燥器のファンおよびヒータにより運動量と熱を与えられ、乾燥室およびコンブおよびコンブ棚を加熱する。乾燥室上部に設置されたファンにより内部の空気が攪拌される。乾燥に使用され、湿分を含む内部の空気は乾燥室上部に設置された排気ファンにより排気される。ヒータは寺島商会社製間熱式乾燥器 TSH-125 を用いている。この実験では、乾燥対象として家庭用キッチンペーパー108  $[\text{m}^2]$ を模擬昆布として乾燥棚に配置した後、水 144  $[\text{kg}]$ を付加し、乾燥過程における温湿度を計測した。

Fig.2 に実験で設置した温湿度センサ (sensirion 社製 SHT-75) の配置図を示す。温湿度センサ 72 個を用いた同時計測を行い、温湿度の時間変化および分布を調べた<sup>(4)</sup>。さ

らには、ANSYS ICEM CFD 13.0 を用い計算格子を作成し、汎用流体解析コード ANSYS Fluent 13.0 を用い、熱および流体について計算した<sup>(5)</sup>。支配方程式である質量保存則およびエネルギー方程式および運動量方程式をそれぞれ、式(1)、(2)および(3)に示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad - (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad - (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad - (3)$$

## 2-2. 計算結果の精度検証と昆布乾燥施設の問題点

Fig.3 に温度の誤差絶対値の平均値の分布を示す。誤差は(計算値)-(実測値)で定義されており、コンターは誤差の大きさを示している。局所的に 10[C] 程度の誤差を有しているものの、72 点の誤差の平均値は 1.85 [C]程度であり、温度の最大値に対して平均 3.9%程度の誤差を有していることが確認できた。

Fig.4 に乾燥室内部の 55[C]温度の等値面図(定常計算結果)を示す。この結果では乾燥開始から十分な時間が経過し、水分の移動などの時間変化が生じなくなった終端状態を想定している。この乾燥室では、入口境界がヒータの吸い込み口に対して非対称な配置になっているため、入口境界から流入した空気の一部はヒータを経ずコンブ・棚に向かう。その結果、長辺方向を軸とした複雑な流れが発生し、入口境界付近から出口付近までの高温でない領域が存在すると考えられる。加えて、コンブの存在する乾燥室下部だけでなく、乾燥室上部にも高温領域が分布していることから、効果的でない乾燥であることも推察できる。

壁面における対流熱伝達により外部へ流出する熱量および排気ファンから外部へ流

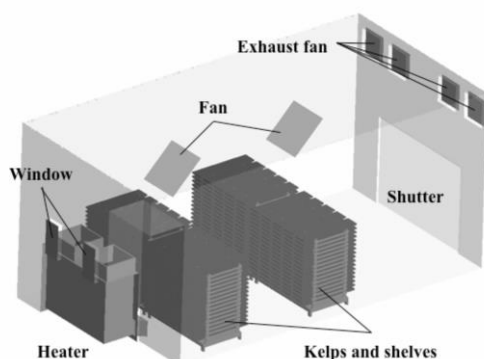


Fig. 1 昆布乾燥室の模式図

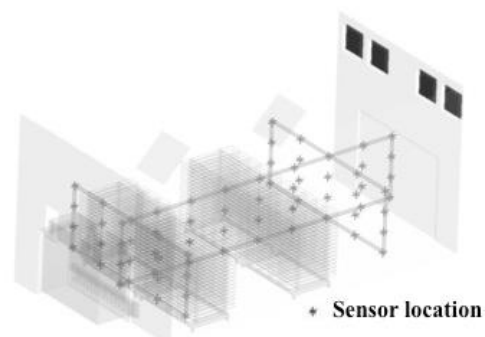


Fig.2 温湿度の計測点

出する熱量はそれぞれ、9 [kW] および 135 [kW] 程度であった。この計算条件では平衡状態である乾燥の終端状態を想定しており、水の相変化と蒸気の移動は計算されていない。そのため、実際のコンブの乾燥過程では、過程のほとんどの時刻において、この結果より内部空気の温度が低くなるため、廃棄される熱量が小さくなると考えられる。

排気ファンから熱量の多くが放出されていることが確認できた。この乾燥室モデルでは、水蒸気の排出のための排気ファンによって、多くの熱量を失っている。コンブ乾燥の効率化にはこの点に関する調査およびマニュアル化が必要と言える。

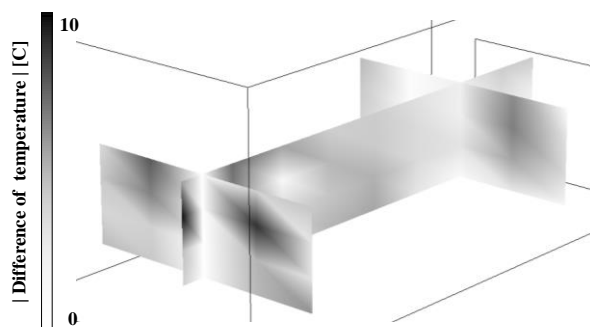


Fig.3 実験値と予測値の誤差分布

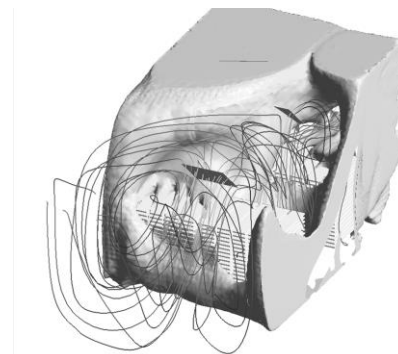


Fig.4 乾燥室内部の温度の等値面図

### 3. ソバ粉乾燥機

#### 3-1. 諸言

ソバは古来より食されており、日本人にとっても馴染みのある食物である。その乾燥方法は古くから島立て法という自然乾燥が用いられてきたが、近年では人工的な乾燥方法が用いられている。粒子の乾燥を含む数値計算の実現を目的とし、粒子の水分の蒸発を含む気流乾燥機の数値計算を行った。

#### 3-2. 計算条件

Fig.5 に計算に用いた平岩鉄工所製気流乾燥機の形状、境界条件および格子形状を示す。気流乾燥機は温風と空気および粒子がそれぞれ流入する2つの入口境界と2つのサイクロンコレクターを介すことにより粒子が回収された空気が流出する出口境界を有している。計算格子は ANSYS ICEM CFD13.0 により作成され、要素数、格子点数および平均  $y^+$  はそれぞれ、500万、200万および20となっている。汎用数値計算コード fluent 13.0 によって熱流体および粒子(分散相)について計算した。

粒子は fluent 分散相モデルの多成分粒子として定義した。多成分粒子は2つ以上の物質が均一に混ざりあった粒子であるため、ソバと水が常に均一な状態で混ざり合うと仮定している。また、ソバは相変化を行わず、水のみが相変化するものと仮定する。粒径、流入量、密度および水の質量分率はそれぞれ、100 [ $\mu\text{m}$ ]、0.555 [g/s]、500 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] および

0.167 となっている。流体要素の支配方程式は質量保存則(式 (1))および運動量方程式(式 (2))およびエネルギー方程式(式(3))である。粒子はラグランジュ的に扱われる。粒子の運動方程式を式(4)に示す。粒子に生じる力は連続相との速度差によって粒子に生じる抗力, 熱泳動力  $F_T$ <sup>(6)</sup> および重力によって構成され, 粒子の慣性力と等式化されている。連続相と粒子の速度差  $u - u_p$  [m/s], 粘度  $\mu$  [Pa\*s], 粒子密度  $\rho_p$  [kg/m<sup>3</sup>], 粒子直径  $d_p$  [m],  $Re$  数および抗力係数  $C_D$  によって抗力は定義される。  $C_D$  は Morsi と Alexander の定数と  $Re$  数によって導出される<sup>(7)</sup>。

粒子の熱収支式を式(5)に示す。式(5)は粒子の温度変化が熱伝達項と蒸発項で構成され, 粒子の温度  $T_p$  [K] の時間変化が熱伝達係数  $h$  [W/(m<sup>2</sup>\*K)], 粒子温度と連続相の局所温度  $T_\infty$  [K] および粒子の表面積  $A_p$  [m<sup>2</sup>] による熱伝達と潜熱  $L$  [J/kg], 分子量  $M$  [kg/mol], 物質移動係数  $k_c$  [m/s], 粒子表面における蒸気のコルモウ濃度  $C_s$  [kgmol/m<sup>3</sup>] および連続相の局所的な水蒸気のコルモウ濃度  $C_\infty$  による蒸発が定義される。水のみが相変化するため, 粒子表面の蒸気濃度は飽和状態にあると仮定した。連続相への熱伝達係数は  $Re$  数と  $Pr$  数を用いた  $Nu$  数の相関式により, 物質移動係数は  $Re$  数と  $Sc$  数を用いた Sherwood 数の相関式により導出される。

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} (u - u_p) + F_T + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad - (4)$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + L A_p M k_c (C_s - C_\infty) \quad - (5)$$

### 3-3. 計算結果

Fig.6 に粒子流入から 0.5[s]後の計算結果を示す。 Fig.6(a)および(b)はそれぞれ,流入し

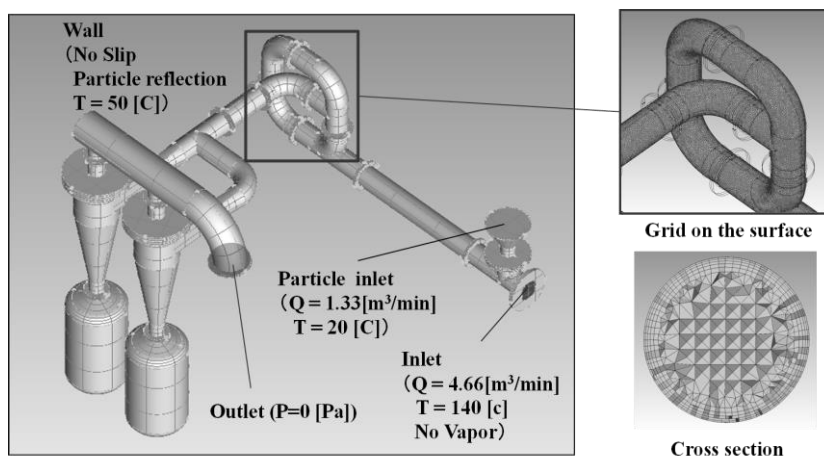


Fig.5 気流乾燥機の形状, 境界条件および格子形状

た粒子とその水の体積分率および入口境界付近の直線部の中央付近断面に付おける水の質量分率分布を示す。入口境界から移動するにつれ、粒子の水の体積分率は低下し、粒子付近の連続層の水の体積分率が上昇することが確認できる。連続層の入口境界では水分が0であるため、水分は粒子のみから連続層に移動する。粒子入口付近で水の質量分率が低く、粒子の入口境界における温度が20[C]であり、入口境界の温度が140[C]であることを考慮すると、粒子が熱風によって温められ、水分が移動していることが読み取れる。このモデルで粒子に含まれる水分の蒸発が生じることが確認できた。

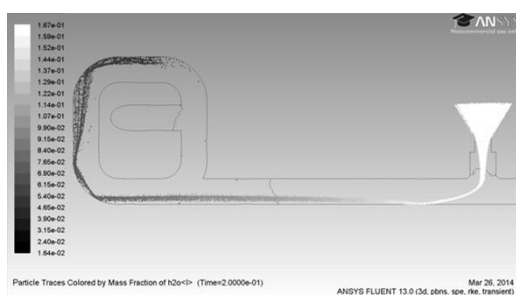


Fig.6 粒子分布とその水の質量分率

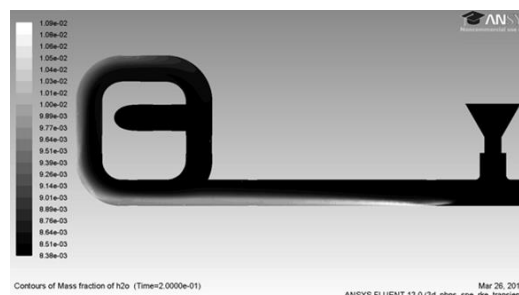


Fig.7 連続相の水の質量分率

#### 4. 結言

三陸地方で用いられるコンブ乾燥室の数値解析を行った。その結果、数値解析は平均3.9 [%] 程度の温度の誤差を有することが確認できた。また問題点として、コンブ付近に低温領域が存在すること、乾燥室上部にも高い温度の領域が存在すること、排気ファンから多くの熱量が排気されることが確認された。この計算モデルを用いた乾燥室の適正化を通じ、コンブ乾燥の効率化およびマニュアル化に資する必要がある。

粒子中の水分の蒸発を含む気流乾燥機の数値計算を行い、粒子からの水分の蒸発が行われることを確認した。今後、実験的検証を通じ、精度の検証をする必要がある。

#### 参考文献

- (1) 林弘通, 調理科学, Vol.24, No4, pp.333-338, 1991
- (2) 林弘通, 調理科学, Vol.25, No1, pp.66-75, 1992
- (3) 宮田勉, “岩手県産コンブの市場ポジション”, 岩手県水産技術センター, <http://www.pref.iwate.jp/~hp5507/report/seika16/6konbu.htm>, (参照日 2012年11月21日)
- (4) 井村忠継ら, 日本機械学会 東北支部第49期総会・公演会 公演論文集,132, CD-ROM,2014
- (5) 井村忠継ら, 日本機械学会 第91期流体工学部門講演会 公演論文集, G0105 (USB),2013
- (6) L.Talbot et al., J. Fluid Mech., Vol.101(4), pp.737-758, 1980
- (7) S. A. Morsi et al., J. Fluid Mech., Vol. 55(2), pp. 193-208, 1972.